

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
КАЗАНСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. Е. К. ЗАВОЙСКОГО  
КАЗАНСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(КФТИ КазНЦ РАН)

420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7

тел.: (843) 272-05-03, факс: (843) 272-50-75, e-mail: phys-tech@kfti.knc.ru, http://www.kfti.knc.ru

ОКПО 02700049, ОГРН 1021603630025, ИНН/КПП 1653009219/166001001

28.05.2015 № 1834/25-2171/90

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

ИО Директора КФТИ КазНЦ РАН

Тарасов Б.Ф.

« 25 » мая 2015

### ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации САМОХВАЛОВА А.В. «Неоднородные состояния и интерференционные явления в гибридных сверхпроводящих системах», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Одним из ключевых игроков на поле современных высоких технологий является спинтроника – научное направление, ориентированное на создание информационных устройств, в которых логические операции будут контролироваться спиновыми токами, а потому осуществляться быстрее и эффективнее, нежели в традиционных зарядовых цепях с полупроводниковыми транзисторами. Критическим элементом спинтроники является реализация настолько медленной релаксации спиновой поляризации, чтобы можно было управлять спиновыми токами и считывать результаты операций с ними. Однако, как правило, в твердых телах типичное спиновое время жизни очень мало из-за спин-орбитального взаимодействия и процессов рассеяния с переворотом спина.

Эффективным решением задачи увеличения спинового времени жизни может стать использование сверхпроводников. Действительно, для квазичастиц с энергией порядка сверхпроводящей щели эффективный заряд близок к нулю, что подавляет диссипацию и разрушение когерентности при их взаимодействии друг с другом и с зарядовым шумом. При этом средняя скорость квазичастиц настолько мала, что время их рассеяния на дефектах и примесях (в том числе магнитных) гораздо больше, чем в нормальном состоянии. В результате, время жизни проекции спина в сверхпроводнике может быть на несколько порядков больше, чем в ферромагнитном металле, что и требуется для спинтроники. Это позволяет говорить об исключительно широких перспективах именно сверхпроводящей спинтроники.

Для разработки функциональных возможностей сверхпроводниковых спинтронных приборов необходимо понять, как влияют друг на друга особенности сверхтока и магнитной конфигурации, а также разобраться в специфике сосуществования и конкуренции сверхпроводимости и спинового магнетизма в реальных неоднородных условиях. Несомненная актуальность и практическая значимость диссертации Алексея Владимировича Самохвалова «Неоднородные состояния и интерференционные явления в гибридных сверхпроводящих системах», заключаются в том, что она направлена на решение именно этого комплекса проблем.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Список цитированный литературы из 494 наименований достаточно полно отражает состояние проблемы.

**В первой главе** проведены расчеты потенциала парного взаимодействия наклонных вихрей в пленках анизотропного и слоистого сверхпроводников. Рассмотрение проводится в рамках феноменологической модели Лондонов. Показано, что деформация вихревых нитей из-за взаимодействия двумерных вихрей в слоях и джозефсоновских межслойных вихрей вызывает их взаимное притяжение, что, в свою очередь, приводит к перестройке вихревой решетки и формированию цепочек вихревых нитей. Кроме того, притягивающее взаимодействие между вихрями приводит к неоднородной плотности вихревых цепочек, расположенных более плотно вблизи джозефсоновских вихрей. В этой же главе исследуются условия формирования необычных вихревых структур в виде цепочек вихрей конечной длины и вихревых решеток с несколькими квантами магнитного потока в элементарной ячейке.

**Вторая глава** посвящена изучению спектра элементарных возбуждений и волновых функций квазичастиц в вихревой нити, запиннированной на цилиндрической полости с диаметром, порядка сверхпроводящей длины когерентности. Исследована трансформация подщелевой ветви спектра из-за нормального отражения квазичастиц от поверхности дефекта. С учетом этих изменений предложена микроскопическая модель депиннинга вихрей под действием транспортного тока,

**В третьей главе** приводятся результаты исследования неоднородных и вихревых состояний в структурах С/Ф с односвязной геометрией, в которых орбитальный и обменный механизмы конкурируют друг с другом, а эффект близости может стимулировать переходы между сверхпроводящими состояниями с различным орбитальным моментом. Показано, что в таких системах эффект близости и обменное поле формируют неоднородное состояние с ненулевым обменным орбитальным моментом. Установлена возможность управления 0- и  $\pi$ -состояниями контактов в гетерогенной фазе, состоящей из сверхпроводящих наноструктур, помещенных в ферромагнитную матрицу.

**В четвертой главе** построена теория, описывающая свойства гибридных систем, состоящих из джозефсоновского перехода, помещенного в неоднородное поле ферромагнитных частиц.

**Пятая глава** посвящена новому интерференционному механизму дальнего действия джозефсоновского транспорта в однородно-намагниченном тоном ферромагнитном слое. Он обеспечивается синглетной компонентой сверхпроводящего конденсата. Это, пожалуй, наиболее интересная часть диссертационной работы. Ранее полагалось, дальнее действие сверхпроводящий транспорт в ферромагнитном слое С/Ф системы обуславливается исключительно триплетной компонентой, возникающей, в частности, вследствие неоднородности намагниченности ферромагнитного слоя. Вместе с тем, в целом ряде экспериментов, в которых наблюдалось дальнее действие, ликвидация неоднородности намагниченности в ферромагнитном слое не приводила к исчезновению сверхпроводящего тока, протекающего через «длинный» ферромагнитный слой.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Теперь переходим к оценке диссертации и ее основных результатов. Прежде всего следует отметить, что в последнее десятилетие в теоретических исследованиях вихревого состояния слоистых сверхпроводников и процессов, происходящих вблизи границы раздела сверхпроводник/ферромагнетик, достигнут значительный прогресс. Нельзя не отметить, что в определенной степени он обусловлен и деятельностью группы, в составе которой работает А.В. Самохвалов.

**Научная новизна** полученных в диссертации результатов заключается в следующем:

- рассчитана энергия взаимодействия наклонных вихревых нитей в тонких слоистых сверхпроводниках с учетом их притяжения под влиянием деформации джозефсоновских межслойных вихрей и отталкивания их полей рассеяния вне пленки;

установлены условия формирования вихревых кластеров и многоквантовых вихревых решеток;

- вычислен спектр подщелевых возбуждений квазичастиц в вихревой нити, запиннигованной на цилиндрической полости; показано существование запрещенной зоны (минищели) в области уровня Ферми; предложена модель депиннинга вихрей под действием транспортного тока с учетом изменения спектра квазичастичных возбуждений;

- установлены условия реализации  $\pi$ -состояния и генерации спонтанных вихревых токов в композитной среде, состоящей из сверхпроводящих гранул, помещенных в ферромагнитный металл; показана возможность управления 0- и  $\pi$ -состояниями контактов С/Ф/С при изменении температуры;

- изучена термодинамика фазового перехода между 0- и  $\pi$ -состояниями трехслойной структуры С/Ф/С с тонкими сверхпроводящими слоями, когда параметр порядка в сверхпроводящих слоях заметно подавлен из-за эффекта близости С/Ф;

- замечательным успехом диссертанта, на наш взгляд, является обнаружение нового механизма дальнего действия в мезоскопических С/Ф/С структурах. В отличие от дальнего действия, характерного для триплетной компоненты сверхпроводящего конденсата, в рассмотренном случае дальнее действие обуславливается синглетной компонентой.

По работе можно сделать следующие замечания:

1. «Механизм возникновения осцилляций волновой функции куперовских пар в ферромагнетике вблизи SF границы аналогичен механизму образования неоднородного состояния Ларкина-Овчинникова-Фульде-Феррелла (ЛОФФ)», пишет автор во Введении на стр. 7. Далее подобное утверждение повторяется в соответствующих оригинальных главах. На наш взгляд, точнее говорить о том, что обменное поле действует двояким образом. В объемном сверхпроводнике оно приводит к неоднородному параметру порядка, которое весьма трудно наблюдать экспериментально. В свою очередь, в мультислойных С/Ф структурах обменное поле вызывает осцилляции парной волновой функции в ферромагнитном слое, вследствие ненулевого момента куперовской пары. Следует заметить, что возникающие при этом интерференционные эффекты, неоднократно наблюдавшиеся экспериментально, представляют значительный прикладной интерес.

2. Следует отметить некоторую небрежность и поверхностность в ссылках:

а) на стр. 98 написано: «Экспериментально формирование  $\pi$ -фазы определяют по поведению критической температуры  $T_c$  перехода гибридной системы в нормальное состояние [25, 26]...». Однако, лишь первая из этих ссылок действительно относится к работе, указывающей на возникновение  $\pi$ -связи двух сверхпроводящих слоев через ферромагнитный слой в С/Ф/С структуре. Вторая же, отсылает читателя к работе [26], где изучалась трехслойная структура Ф/С/Ф, в которой имеется всего один сверхпроводящий слой, и ни о какой  $\pi$ -связи говорить не приходится;

б) при обсуждении эффекта спинового клапана (вентиля), упоминаемого на стр. 97, приводятся ссылки на теоретические работы Тагирова [298] и Буздина с соавторами [299]. Вслед за этими полностью обоснованными ссылками автор ссылается на первую экспериментальную работу в этой области, выполненную в группе S. Bader [300], в которой была обнаружена лишь небольшая разница в критических температурах  $T_c$ , соответствующих параллельной и антипараллельной взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев. К сожалению, в поле зрения диссертанта не попала работа Лексина и др. [Appl. Phys. Lett. 97, 02505 (2010)], в которой впервые был экспериментально наблюден полный эффект спинового клапана.

в) два первых замечания относились к цитированию экспериментальных работ; следующее замечание касается работ теоретических. Следует указать, что ссылка на публикацию Хусаинова и др., с интерпретацией механизма возвратной сверхпроводимости [290], приведенная на стр. 112, уместна только при условии цитирования последующей работы этих же авторов [M. G. Khusainov et al. Phys. Rev. B 62,

6832 (E) (2000)], в которой существенным образом скорректированы полученные ими ранее результаты

Отмеченные выше отдельные недостатки ни в коей мере не отражаются на общем положительном впечатлении от этой объемной и весьма результативной работы, написанной не только с глубоким пониманием наиболее актуальных проблем исследуемой области, но и с ясным представлением о новых технологических возможностях, открывающихся в результате их решения. В диссертации получен ряд весьма интересных результатов, **достоверность** которых подтверждается адекватностью используемых теоретических подходов и приближений, а также и тем, что в асимптотических случаях они переходят в ранее известные результаты для сверхпроводящих низкоразмерных систем или соответствуют точным решениям задач о вихревом состоянии неоднородных сверхпроводников.

Подводя итоги можно констатировать, что диссертация Самхвалова А.В. представляет собой оригинальное и завершённое исследование физики сверхпроводящих гибридных систем. Результаты исследований и выводы, представленные в диссертации, являются полезным вкладом в физику систем, в которых реализуется неоднородное сверхпроводящее состояние.


Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в таких научных учреждениях как Институт физики металлов УрО РАН, Институт физики твердого тела РАН, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН.

Основные положения диссертации достаточно полно опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, включенных в Перечень ВАК, и доложены на российских и международных конференциях.


Учитывая актуальность темы проведенных исследований, строгую обоснованность всех результатов диссертации, их научную значимость, можно заключить, что работа Самохвалова А.В. «Неоднородные состояния и интерференционные явления в гибридных сверхпроводящих системах» удовлетворяет всем требованиям Положения «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, а сам диссертант безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Заведующий лабораторией физики перспективных материалов  
Казанского физико-технического института РАН,  
доктор физ.-мат. наук, профессор

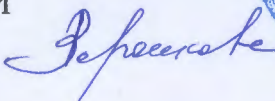
  
Г.Б. Тейтельбаум

Главный научный сотрудник лаборатории  
физики перспективных материалов  
Казанского физико-технического института РАН,  
доктор физ.-мат. наук, профессор

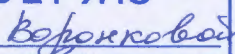
  
И.А. Гарифуллин

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и одобрен Ученым Советом КФТИ  
20 мая 2015 г. (протокол № 19).

Ученый секретарь КФТИ  
доктор физ.-мат. наук,



  
В.К. Варонкова

**ЗАВЕРЯЮ**  
ПОДПИСЬ  В.К.  
/Зав. канцелярией КФТИ КазНЦ РАН  
А.В. Губайдуллина